

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.43

doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-51-62

## КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТРЕЩИН В ГОЛОВКЕ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ ДВС НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Николай Александрович Загородний<sup>1</sup>, Алла Сергеевна Семькина<sup>2</sup>, Сергей Владимирович Новиков<sup>3✉</sup>, Евгений Александрович Федотов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

<sup>1</sup> n.zagorodnij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>

<sup>2</sup> fantarock@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4045-4237>

<sup>3</sup> svnovbel@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7149-088X>

<sup>4</sup> efedotov80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9148-6728>

### Аннотация

Цель исследования: разработка комплексного алгоритма косвенной диагностики трещин в ГБЦ на основе синхронного анализа динамики абсолютного давления в системе охлаждения и скачков температуры охлаждающей жидкости с привязкой к режимным параметрам работы ДВС.

Задача, решению которой посвящена статья – верификация алгоритма цифровой обработки сигналов, позволяющего автоматизировать процесс определения наличия неисправности с помощью выявления слабых диагностических признаков на фоне естественных шумов и колебаний путем фильтрации, дифференцирования, статистического анализа и синтеза интегрального критерия.

Методы исследования. Прогнозирование, математическое моделирование, статистический анализ, системный анализ, теория надежности, теория вероятности, теория управления.

Новизна работы заключается в рассмотрении, как совместного фактора синхронной динамики абсолютного давления и температуры в системе

охлаждения, как взаимодополняющих признаков одного дефекта, что позволяет повысить достоверность диагноза по принципу перекрестной проверки.

Результаты исследования. Предложен усовершенствованный метод косвенного определения данной неисправности на основе комплексного анализа динамики давления в системе охлаждения и нестационарного теплового состояния охлаждающей жидкости.

Выводы. Диагностическая информативность параметров системы охлаждения (давления и температуры) значительно возрастает при анализе их динамики (производных по времени), синхронизированных с соответствующими режимами работы двигателя. Критическими зонами для проявления дефекта являются режимы установившейся высокой нагрузки и резких переходных ускорений.

**Ключевые слова:** диагностика, головка, блока, цилиндр, давление, температура, метод, статистический анализ, алгоритм.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Ссылка для цитирования:

Загородний Н.А. Косвенные методы диагностики трещин в головке блока цилиндров ДВС на основе комплексного анализа параметров системы охлаждения / Н.А. Загородний, А.С. Семькина, С.В. Новиков, Е.А. Федотов // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 6. – С. 51-62. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-51-62.

Original article

Open Access Article

## INDIRECT METHODS FOR DIAGNOSING CRACKS IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE CYLINDER HEAD BASED ON A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF COOLING SYSTEM PARAMETERS

# Nikolay Aleksandrovich Zagorodny<sup>1</sup>, Alla Sergeevna Semykina<sup>2</sup>, Sergey Vladimirovich Novikov<sup>3</sup>, Evgeny Aleksandrovich Fedotov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

<sup>1</sup> n.zagorodnij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>

<sup>2</sup> fantarock@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4045-4237>

<sup>3</sup> svnovbel@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7149-088X>

<sup>4</sup> efedotov80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9148-6728>

## Abstract

The study objective is to develop a comprehensive algorithm for indirect diagnosis of cracks in a cylinder head based on a synchronous analysis of the dynamics of absolute pressure in the cooling system and temperature jumps of the coolant with reference to the operating parameters of the internal combustion engine.

The task to which the paper is devoted is the verification of a digital signal processing algorithm that makes it possible to automate the detection of malfunctions by revealing weak diagnostic signs against the background of natural noise and vibrations by filtering, differentiating, statistical analysis and synthesis of an integral criterion.

Research methods. Forecasting, mathematical modeling, statistical analysis, system analysis, reliability theory, probability theory, management theory.

The novelty of the work is in considering the joint factor of synchronous dynamics of absolute pres-

sure and temperature in the cooling system, the complementary signs of a single defect, which makes it possible to increase the reliability of the diagnosis based on the principle of cross-checking.

Study results. An improved method for indirect determination of given malfunction is proposed based on a comprehensive analysis of the pressure dynamics in the cooling system and unstable thermal state of the coolant

Conclusions. Diagnostic information content of the cooling system parameters (pressure and temperature) increases significantly when analyzing their dynamics (time derivatives) synchronized with the corresponding engine operating modes. The critical zones for the demonstration of the defect are the modes of steady high load and sudden transient accelerations.

**Keywords:** diagnostics, head, block, cylinder, pressure, temperature, method, statistical analysis, algorithm.

**Acknowledgements:** The paper is written as a part of implementation of the federal university support program "Priority 2030" using the equipment based on the High Technology Center of BSTU named after V.G. Shukhov.

## Reference for citing:

Zagorodny NA, Semykina AS, Novikov SV, Fedotov EA. Indirect methods of diagnosing cracks in the internal combustion engine cylinder head based on a comprehensive analysis of cooling system parameters. *Transport Engineering*. 2026;6:51-62. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-51-62.

## Введение

Современные двигатели внутреннего сгорания работают в условиях высоких тепловых и механических нагрузок, что предъявляет повышенные требования к надежности их конструктивных элементов. Одной из наиболее сложных и критических неисправностей является появление трещин в теле головки блока цилиндров, соединяющих полость камеры сгорания с каналами системы охлаждения [1]. Данный дефект может быть вызван термоусталостью материала, детонацией, локальным перегревом или производственным браком.

Традиционные методы неразрушающего контроля (магнитно-порошковая дефектоскопия, ультразвуковой контроль, капиллярный метод) обладают высокой точностью, но их применение неизбежно связано с полной или частичной разборкой

двигателя, что делает их непригодными для оперативной диагностики и исключает их интеграцию в системы бортового мониторинга [2].

В качестве альтернативы могут быть предложены косвенные методы, основанные на регистрации вторичных признаков неисправности. Метод анализа состава газов в расширительном бачке системы охлаждения на наличие продуктов сгорания мог бы оказаться достаточным и предпочтительным [3]. Однако данный метод требует отбора проб и использования газоанализаторов. Физической основой предлагаемого в данной работе метода являются два ключевых явления, сопровождающих прорыв газов: возникновение избыточного давления и локальное изменение теплового режима.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

При наличии сквозной трещины в головке блока цилиндров (ГБЦ) в системе охлаждения наблюдаются два взаимосвязанных физических явления. Во время тактов сжатия и последующего такта рабочего хода в цилиндре создается давление  $P_{ц}$ ,

$$P_{co}(t) = P_{term}(t) + \Delta P_{газ}(t) + P_{АТМ}, \quad (1)$$

где  $P_{co}(t)$  – суммарное давление в системе охлаждения;  $P_{term}(t)$  – давление, обусловленное тепловым расширением охлаждающей жидкости (зависит от температуры);  $\Delta P_{газ}(t)$  – добавочное давление от прорыва газов (импульсный, затухающий характер);  $P_{АТМ}$  – атмосферное давление.

Во время эксплуатации автомобиля на режимах с высокой нагрузкой двигателя, считываемой как диагностический параметр, наблюдаются высокие значения давления в цилиндре (высокие значения  $P_{ц}$ ). Амплитуда значений добавочного давления от прорыва газов ( $\Delta P_{газ}(t)$ ) в таких условиях также значительно возрастает. Давление в системе охлаждения ( $\Delta P_{газ}(t)$ ) становится нестабильным и ввиду пульсирующего характера может рассматриваться как диагностический параметр, подтверждающий наличие трещины в ГБЦ или других дефектов нарушения герметичности как уплотнений газового стыка блока ДВС с ГБЦ, так целостности головки и блока цилиндров. При этом ценность заключается не в измерении абсолютного значения давления, и температуры, а в оценке динамики их изменения в сравнении с эталонным заведомо работоспособным двигателем, эксплуатирующем на тех же режимах [4].

## Методика эксперимента и сбора данных

Для реализации метода предлагается дооснащение штатной системы охлаждения и установка электронного модуля, считывающего диагностические коды системы самодиагностики автомобиля.

Дооснащение системы охлаждения реализовано за счет установки датчика абсолютного давления в крышку расширительного бачка. Требования к датчику: рабочий диапазон измерения давления 0...2,5 бар (абс.), точность  $\pm 0,5\%$ , частота

достигающее до 200 бар в дизельных двигателях. Часть газов через трещину проникает в каналы системы охлаждения. Давление в системе охлаждения  $P_{co}$  можно представить, как сумму:

При прорыве газов (температура газов до 1000 °С) в систему охлаждения со стороны камеры сгорания провоцирует следующие эффекты:

1. Непосредственный нагрев охлаждающей жидкости в зоне прорыва газов. Перегретый объем жидкости далее переносится потоком жидкости, частично смешиваясь с ним регистрируется штатным датчиком температуры (ДТОЖ), как кратковременный скачок  $\Delta T_{кр}$ .

2. Проникание значительного объема газов и образование газовых пробок (паровых пузырей) в рубашке охлаждения, что ухудшает теплоотвод от стенок цилиндров и ГБЦ, а также может приводить к общему росту температуры вследствие ухудшения эффективности работы системы охлаждения в целом [5-8].

Тепловой поток от прорвавшихся газов  $Q_{газ}$  приближенно можно оценить по формуле:

$$Q_{газ} \approx m_{газ} C_p (T_{газ} - T_{ож}), \quad (2)$$

где  $m_{газ}$  – масса прорвавшегося газа;  $C_p$  – его удельная теплоемкость;  $T_{газ}$  и  $T_{ож}$  – температуры газа и охлаждающей жидкости.

Даже незначительная масса прорвавшихся газов  $m_{газ}$  при высоком значении разницы температур ( $\Delta T$ ) может вызвать заметный локальный эффект.

опроса не менее 10 Гц (для регистрации быстрых процессов), выходной сигнал – цифровой (CAN) или аналоговый (0-5В).

Штатный датчик температуры охлаждающей жидкости (ДТОЖ) доработки не требует, так как обладает достаточной чувствительностью и быстротой срабатывания, поскольку является одним из основных датчиков, сигнал которого используется для расчета точных параметров подачи топлива системой *COMMON RAIL*.

На исследуемых автомобилях КАМАЗ 6520 считывание необходимой для анализа информации возможно за счет считывания диагностических параметров непосредственно из шины CAN дополнительным установленным электронным модулем. Требуемая частота опроса датчика для регистрации быстро изменяющихся процессов порядка 10 Гц реализуема в штатном режиме работы диагностической шины в большинстве режимов работы ДВС, которые соответствуют условиям проведения эксперимента [9-12].

Регистрируемый перечень технических (диагностических) параметров достаточный для исследования:

- Частота вращения коленчатого вала (n, об/мин).
- Нагрузка двигателя (%).
- Температура охлаждающей жидкости (°C)
- Давление в системе охлаждения (кПа) [13, 14].

Сбор вышеперечисленных диагностических параметров проводился в режиме реального времени с частотой считывания параметров 10Гц.

С целью обеспечения репрезентативной выборки для анализа в ходе исследований проводились серии тестовых заездов на нескольких автомобилях с идентичными моделями двигателей (КАМАЗ 740.632-400 Евро 4). Автомобили были разделены на 2 группы:

- первая группа с заведомо работоспособными двигателями (количество автомобилей в контрольной группе,  $N=21$ );
- вторая группа с подтвержденной трещиной в ГБЦ (количество автомобилей в диагностируемой группе,  $N=10$ ). Каждый тест включал унифицированные режимы продолжительностью 15...20 минут.

В табл. 1 приведен перечень тестовых режимов и их характеристики, позволяющие произвести сбор статистической информации для проведения необходимых расчетов.

Таблица 1

Характеристика тестовых режимов

Table 1

*Characteristics of test modes*

№ п/п	Название режима	Характеристика режима	Что проверяется
1	Прогрев и холостой ход	Работа ДВС на холостом ходу	Определение фоновых значений параметров
2	Установившийся режим	Движение с постоянной скоростью (50, 80, 100 км/ч)	Оценка стабильности параметров
3	Резкое ускорение	3-5 циклов полного нажатия педали акселератора на средних частотах вращения коленчатого вала. 2 – 3 передача	Регистрация скачков давления и температуры
4	Движение «в натяг»	Движение на высшей передаче при полном нажатия педали акселератора (1500-2000 об/мин)	Регистрации роста давления и температуры и определение разницы между заведомо работоспособными и неисправными ДВС

В табл. 2 приведен фрагмент сбора технических данных, зарегистрированных в режиме резкого ускорения на двигателе с дефектом ГБЦ. Жирным шрифтом выделены аномальные величины резкого изменения значений параметров температуры охлаждающей жидкости и давления в системе охлаждения.

Поскольку, подтверждением наличия трещин из камер сгорания в полости си-

стемы охлаждения является регистрация резких температурных скачков, а также скачков давления в системе охлаждения, провоцируемых прорывом газов, в качестве наиболее подходящего критерия целесообразно выбрать дополнительные параметры, полученные на основе расчета первых производных температуры охлаждающей жидкости и абсолютного давле-

ния по времени. Их вычисление производится по следующим формулам:

$$dP/dt_i = (P_i - P_{i-1}) / \Delta t, \quad (3)$$

$$dT/dt_i = (T_i - T_{i-1}) / \Delta t, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – период дискретизации (0,1с), соответствующий частоте обновления данных о величинах технических параметров.

Таблица 2

Фрагмент таблицы сбора данных (режим «резкое ускорение с полным нажатием педали акселератора»)

Table 2

*A fragment of data collection table (sudden acceleration with full pressing of the accelerator pedal mode)*

Время текущее, с	Давление в системе охлаждения P, кПа	Температура охлаждающей жидкости T, °C	Частота вращения коленчатого вала, об/мин	Нагрузка ДВС, %
245,0	120,5	91,2	1210	45
245,1	120,8	91,2	1236	55
245,2	121,1	91,3	1258	62
245,3	135,6	91,3	1372	85
245,4	158,7	91,4	1495	95
245,5	160,6	92,0	1602	98
245,6	162,3	92,8	1711	100
245,7	159,3	93,1	1782	100
245,8	155,9	93,5	1861	100
245,9	150,8	93,1	1866	100
245,0	145,2	92,1	1875	100
245,1	140,1	91,9	1890	100
245,2	135,8	91,8	1902	97
245,3	132,2	91,6	1895	93
245,4	128,4	91,5	1898	85

Кроме того, необходимо установить границы диапазонов для эксплуатационных режимов, в пределах которых оценка значения критерия будет являться значимой для подтверждения или опровержения наличия дефекта (трещины), в связи с этим вводится обобщенный «коэффициент напряженности режима»  $K_r$ , который вычисляется для каждого момента времени:

$$K_r = (n / n_{\max})(L / L_{\max}), \quad (5)$$

где  $n_{\max}$  и  $L_{\max}$  – максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя и нагрузка для данного двигателя.

Аномалии (всплески  $dP/dt$  и  $dT/dt$ , зафиксированные при ( $K_r > 0.7$ )), считаются диагностически значимыми.

После проведения тестовых заездов и сбора статистики для каждого тестового цикла рассчитываются статистические метрики в «критических зонах» (для ре-

жимов с максимальной частотой проявления признаков дефекта (трещин)):

Максимальное отклонение давления:

$$\Delta P_{\max} = \max(P_{\text{крит}}) - P_{\text{уст}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{уст}}$  – среднее давление на установившемся режиме;  $\sigma dP/dt$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) производной давления, характеризующее степень неустойчивости давления [15, 16].

Количество температурных скачков:

$N_T$  – количество случаев, когда  $dT/dt$  превысило пороговое значение (экспериментально установлено значение 2 °C/c), и значение  $\sigma dP/dt$  превысило пороговое значение 30 кПа/с (значение установлено экспериментально);  $D_T$  – скорректированная дисперсия температуры.

На основе множественной линейной регрессии по данным обучающей выборки (работоспособные и неисправные двигатели) выводится формула для интегрального критерия наличия трещины (ИКТ):

$$\text{ИКТ} = a_1 \frac{\Delta P_{max}}{P_{term\_max}} + a_2 \frac{\frac{\sigma_{dP}}{dt}}{\frac{\sigma_{dP}}{dt_{norm}}} + a_3 \frac{N_T}{N_{цикл}} + a_4 \frac{D_T}{D_{T\_norm}}, \quad (7)$$

где ИКТ – интегральный критерий трещины;  $\frac{\sigma_{dP}}{dt}$  – эталонные значения СКО;  $D_{T\_norm}$  – значения дисперсии для работоспособного двигателя;  $N_{цикл}$  – количество проведенных режимов ускорения в тестовом цикле;  $a_1 \dots a_4$  – весовые коэффициенты, полученные в результате регрессионного анализа ( $a_1 = 0,35$ ,  $a_2 = 0,30$ ,  $a_3 = 0,21$ ,  $a_4 = 0,16$ ).

Интерпретация ИКТ:

При значении ИКТ  $< 0,3$  – дефект отсутствует.

При условии  $0,3 \leq \text{ИКТ} < 0,6$  – зона неопределенности принятия решения, рекомендуется повторное тестирование.

При значении ИКТ  $\geq 0,6$  – высокая вероятность наличия трещины в ГБЦ.

По результатам проведения тестовых поездок (всего проведено 62, из них 42 на автомобилях с работоспособными двигателями и 20 с признаками неисправности) был произведен сбор статистики по значениям основных техническим параметрам, определяющим, результаты расчета ИКТ, которые сведены в таблицу и представлены графически.

В табл. 3 приведены значения интегрального критерия трещины для групп работоспособных и неисправных автомобилей, рассчитанных по итогам тестовых заездов.

Минимальное значение в диагностируемой группе (0,58) соответствует двигателю с начальной стадией развития микротрещины, через которую возможен прорыв газов.

Таблица 3

Сводная статистика по интегральному критерию ИКТ

Table 3

Summary statistics on integrated ICT criterion

Группа двигателей	Количество тестов	Среднее значение ИКТ	Медиана ИКТ	СКО ИКТ	Минимум ИКТ	Максимум ИКТ
Работоспособные (Контрольная)	42	0.18	0.16	0.07	0.05	0.32
Неисправные (Диагностируемая)	20	0.79	0.81	0.11	0.58	0.95

На рис. 1 отображена гистограмма распределения ИКТ для работоспособных двигателей. Максимум сильно смещён влево, в зону значений 0,05...0,25, и имеет выраженный пик. Распределение для неисправных двигателей локализовано в зоне значений от 0,65 до 0,95.

Зона перекрытия между распределениями крайне мала (соответствует значениям от 0,3 до 0,45), что подтверждает высокую разделяющую способность критерия.

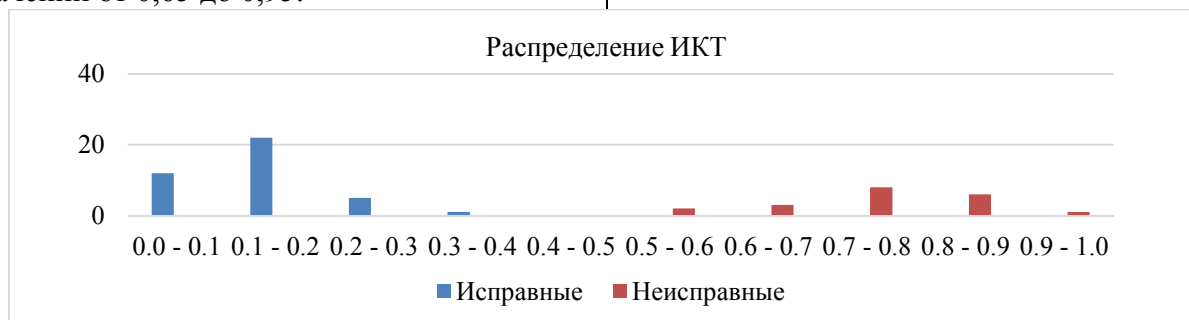


Рис. 1. Распределение значений интегрального критерия трещины на работоспособных и неисправных автомобилях

Fig. 1. Distribution of integral crack criterion values on functional and defective vehicles

Выбранный порог значения ИКТ = 0,6 разделяет группу автомобилей с работоспособным ДВС от группы автомобилей с неисправным ДВС с высокой степенью достоверности.

Для анализа значений технических параметров данные сведены в таблицу, пример фрагмента потока данных представлен в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Данные осциллограмм для работоспособного двигателя

Table 4

*Oscillogram data for a workable motor*

Время, с	Частота вращения КВ, об/мин	Нагрузка ДВС, %	$P$ , кПа	$T$ , °C	$dP/dt$ , кПа/с	$dT/dt$ , °C/с
481,7	1206	43	120,5	91,2	2	1
481,8	1234	56	120,6	91,2	1	0
481,9	1259	65	121,1	91,3	5	1
482,0	1374	89	123,6	91,3	25	0
482,1	1498	96	125,7	91,4	21	1
482,2	1607	99	127,6	91,5	19	1
482,3	1716	100	129,3	91,6	17	1
482,4	1788	100	130,3	91,7	10	1
482,5	1870	99	131,9	91,8	16	1
482,6	1875	100	132,5	91,9	6	1
482,7	1881	100	133,2	92,0	7	1
482,8	1893	100	133,6	92,0	4	0
482,9	1901	98	133,8	92,1	2	1
483,0	1898	93	132,4	92,1	-8	0
483,1	1896	83	132,2	92,0	-2	-1
483,2	1865	80	131,3	92,0	-9	0
483,3	1843	78	130,1	91,9	-12	-1
483,4	1828	76	129,4	91,9	-7	0
483,5	1802	73	128,5	91,8	-9	-1

Таблица 5

Данные осциллограмм для неисправного двигателя

Table 5

*Oscillogram data for a faulty motor*

Время, с	Частота вращения КВ, об/мин	Нагрузка ДВС, %	$P$ , кПа	$T$ , °C	$dP/dt$ , кПа/с	$dT/dt$ , °C/с
638,3	1210	45	120,5	91,2	2	1
638,4	1236	55	120,8	91,2	3	0
638,5	1258	62	121,1	91,3	3	1
638,6	1372	85	135,6	91,3	145	0
638,7	1495	95	158,7	91,4	231	1
638,8	1602	98	160,6	92,0	19	6
638,9	1711	100	162,3	92,8	17	8
639,0	1782	100	159,3	93,1	-30	3
639,1	1861	100	155,9	93,5	-34	4
639,2	1866	100	150,8	93,1	-51	-4
639,3	1875	100	145,2	92,1	-56	-10
639,4	1890	100	140,1	91,9	-51	-3
639,5	1902	97	135,8	91,8	-43	-1
639,6	1895	93	132,2	91,6	-36	-2
639,7	1898	85	128,4	91,5	-38	-9
639,8	1897	81	128,1	91,4	-3	-1
639,9	1861	77	127,3	91,4	-8	0
640,0	1840	72	126,6	91,3	-7	-1
640,1	1825	70	125,4	91,3	-12	0

На рис. 2 отображены графики, характеризующие динамику изменения технических параметров, наиболее значимых для определения наличия или отсутствия дефекта (трещины в ГБЦ). Данные на графиках синхронизированы по времени и соответствуют режиму резкого ускорения на средних частотах вращения коленчатого вала для автомобиля с работоспособным двигателем и автомобиля с неисправным двигателем.

Для работоспособного двигателя характерны следующие основные закономерности:

- на графиках давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ) наблюдается плавный рост, обусловленный увеличением тепловой нагрузки;
- производные ( $dP/dt$ ) и ( $dT/dt$ ) не имеют выраженных экстремальных значений,

превышающих пороговые значения [17-19].

Для неисправного двигателя характерны следующие основные закономерности:

- в момент начала разгона (резкий рост частоты вращения коленчатого вала и нагрузки) на осциллограмме давления наблюдается резкий рост давления, достигающий в пиковом значении амплитуды ~40 кПа относительно средних значений [20]. С небольшой задержкой (обусловленной временем переноса тепла к ДТОЖ) регистрируется скачок температуры на 2...3 °С.

На графиках производных эти события видны как острые, короткие пики, многократно превышающие уровень средних значений.

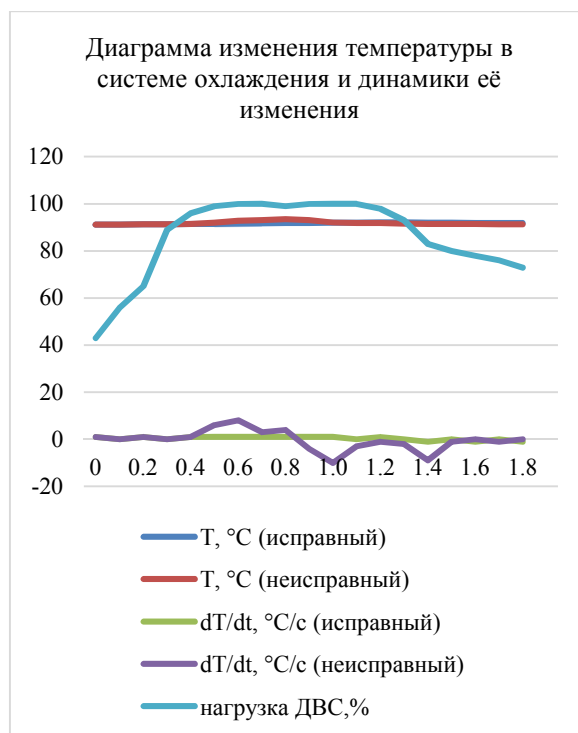
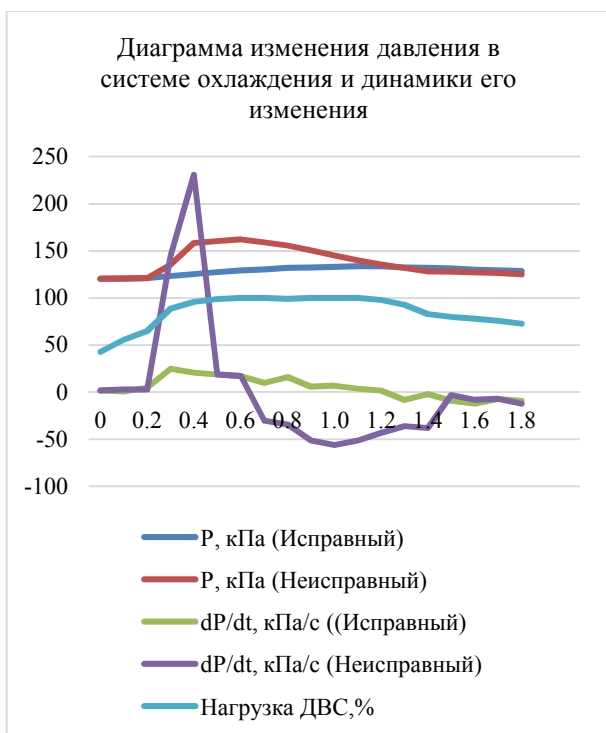


Рис. 2. Графики диаграмм изменения технических параметров, характеризующих величину давления в системе охлаждения ДВС

и динамики его изменения в зависимости от наличия или отсутствия дефекта (трещины)

Fig. 2. Graphs of the change in technical parameters that characterize the pressure in the engine cooling system and its dynamics, depending on the presence or absence of a defect (crack)

## Результаты исследований

Исследование проводилось в 2022 – 2025 г.г. в парке автомобилей КАМАЗ модели 6520 и его модификаций с двигателем КАМАЗ 740.632-400 Евро 4, выполняющих транспортную и технологические ра-

боты в дорожно-строительных организациях г. Белгорода. Исследуемые автомобили оснащены современными электронными системами управления двигателем, что позволяет производить сбор информа-

ции о технических параметрах работы двигателя на основе их считывания непосредственно из цифровой шины *CAN* при условии подключения дополнительных технических средств. Кроме того, потребовалась установка дополнительного датчика давления в расширительный бачок системы

### Обсуждение и заключение

1. Разработан и теоретически обоснован усовершенствованный косвенный метод диагностики трещин в ГБЦ ДВС, основанный на комплексном анализе динамики абсолютного давления и оценки динамики теплового состояния в системе охлаждения.

2. Предложенная методика сбора данных, включающая стандартизированные тестовые циклы с акцентом на переходные режимы, позволяет получать репрезентативную диагностическую информацию.

3. Разработанный алгоритм обработки, включающий фильтрацию, расчет производных, нормировку по режиму и статистический анализ, позволяет выделять слабые сигналы дефекта на фоне штатных изменений параметров.

4. Предложенный интегральный критерий ИКТ, основанный на регрессионной модели, показал высокую разделяющую способность на контрольной и диагностируемой группах, что подтверждается статистическими данными и визуализацией на графиках.

5. Несмотря на то, что данный метод позволяет лишь обнаружить наличие неисправности на ранней стадии, но не может предотвратить саму неисправность, положительный эффект заключается в предот-

охлаждения двигателя. Эти мероприятия дали возможность осуществлять сбор и обработку статистических массивов информации и определить критерии, подтверждающие с высокой достоверностью наличие или отсутствие рассматриваемого в исследовании дефекта (трещины в ГБЦ).

вращении внезапных отказов за счет заблаговременной регистрации признаков проявления неисправности, отслеживания скорости развития дефекта и своевременном принятии мер по минимизации затрат на ремонт, ввиду недопущения развития цепи каскадных отказов с ростом стоимости ущерба и последствий его устранения (минимизация риска перегрева ДВС с последующим разрушением большого количества деталей), а также сокращения времени диагностики, и простоев, связанных с этими мероприятиями.

Таким образом затраты на приобретение дополнительного оборудования (модулей считывания, хранения и передачи сигналов шины *CAN* и датчиков абсолютного давления), работы по установке, отладку и техническое сопровождение составили 33,52 тыс. руб. на один автомобиль. При этом среднее время простоев на ремонте снизилось с 23,8 ч до 15,6 ч, что составило 34,5 %.

Сокращение финансовых издержек (в среднем на 1 автомобиль парка в год) составило 45,1 тыс. руб. от сокращения простоев и 27,2 тыс. руб. на запасные части, что суммарно составляет 72,3 тыс. руб. Экономический эффект от внедрения составляет 38,78 тыс. руб. в год на 1 автомобиль.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Базилевский М.П. Многокритериальный подход к построению моделей парно-множественной линейной регрессии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 88-99.
2. Борисов В.В., Луферов В.С. Метод многомерного анализа и прогнозирования состояния сложных систем и процессов на основе нечетких когнитивных темпоральных моделей // Системы

управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 1-23.

3. Загородний, Н. А. Эксплуатационная надёжность автомобилей в процессе их эксплуатации / Н. А. Загородний // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 1-2(88). С. 101-107.
4. Загородний, Н. А. Формирование диапазонов параметров, определяющих эксплуатационные режимы для отдельных агрегатов автомобилей / Н. А. Загородний // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 1-3(88). С. 110-119.

5. Загородний, Н. А. Построение концептуальной информационной модели системы оценки, прогнозирования и управления эксплуатационной надежностью автомобилей / Н. А. Загородний // Транспортное машиностроение. 2025. № 2(38). С. 16-24.
6. Загородний Н.А. Методика определения влияния пусковых режимов ДВС на изменение эксплуатационных характеристик двигателя / Н.А. Загородний, Ю.А. Заяц, А.С. Семькина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. № 1 (95). С. 88-97.
7. Заяц Ю.А., Заяц Т.М., Загородний Н.А. Решение первой задачи прогнозирования воздействий и остаточного ресурса транспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №3-2(82). С. 25-31.
8. Заяц Ю.А., Голубев Д.С. Постановка задачи прогнозирования остаточного ресурса военной техники и ее элементов // Научный резерв. - Рязань: РВВДКУ, 2021. №2(14). С. 51-56.
9. Заяц Ю.А., Голубев Д.С., Заяц Т.М. Информационный аспект в прогнозировании технического состояния транспортных средств // Информационные технологии и инновации на транспорте: Сборник трудов VII международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Орел. 2021. С. 425-436.
10. Заяц Т.М. Системно-информационный анализ факторов, влияющих на уровень боеготовности вооружения боевой машины / Т.М. Заяц, К.А. Слуцкий // Научный резерв. Рязань: РВВДКУ. 2019. №2(6). С. 38 - 47.
11. Заяц Ю.А. Основы теории надежности: учебник. Рязань: РВВДКУ, 2013. 277 с.
12. Новиков С.В., Загородний Н.А., Семькина А.С., Конев А.А. Анализ резервов возможностей безразборных методов диагностирования состояния грузовых автомобилей Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4-3 (87). С. 45-54.
13. Семькина, А. С. Повышение эффективности технической эксплуатации карьерных самосвалов в условиях автотранспортных предприятий ГОКов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Семькина Алла Сергеевна, 2023. 181 с.
14. Семькина, А. С. Повышение эффективности деятельности автосервисных предприятий посредством использования цифровых и информационных технологий / А. С. Семькина, Н. А. Загородний, А. Н. Новиков. – Белгород - Орел: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – 140 с.
15. Семькина, А.С. Использование цифровых и информационных технологий для повышения эффективности деятельности автосервисных предприятий / А.С. Семькина, Н.А. Загородний, А.А. Конев, Н.А. Щетинин // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1-2 (80). С. 89-97.
16. Семькина, А. С. Направления развития искусственного интеллекта в автомобильной отрасли / А. С. Семькина, Н. А. Загородний, Д. Ф. Коверженко // Научные чтения: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 1076-1079.
17. Семькина, А.С. Организация технологических процессов технического обслуживания и диагностирования автомобилей / А.С. Семькина, Н.А. Загородний, С. Андреева // В сборнике: докладов Международной научно-практической конференции "Научные чтения и инновации" (XXV научные чтения), посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2023. С. 1070-1075.
18. Семькина А.С. Неисправности современных автомобилей. Применение компьютерных программ для расчета технических параметров поршня // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 1751-1756.
19. Семькина А.С., Загородний Н.А., Коверженко Д.Ф. Определение рационального периода эксплуатации карьерных транспортных средств и оценка эффективности их использования // Мир транспорта и технологических машин. 2024. №3-1(86). С. 67-74.
20. Штурманов С.С., Голубев Д.С. Бортовой регистратор параметров работы дизеля УТД-29 БМД-4М // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 11. С. 223-230.

## REFERENCES

1. Bazilevskiy MP. Multi-criteria approach to pair-multiple linear regression models constructing. Izvestiya of Saratov University. Mathematics.Mechanics. Informatics. 2021;21(1):88-99.
2. Borisov VV, Luferov VS. The method of multidimensional analysis and forecasting states of complex systems and processes based on Fuzzy Cognitive Temporal Models. Systems of Control, Communication and Security. 2020;2:1-23.
3. Zagorodny NA. Operational reliability of cars in the process of their operation. Transport and Technological Cars. 2025;1-2(88):101-107.
4. Zagorodny NA. Formation of ranges of parameters that determine the operating modes for individual car units. Transport and Technological Cars. 2025;1-3(88):110-119.

5. Zagorodny NA. Construction of a conceptual information model of a system to assess, forecast and control operational reliability of vehicles. *Transport Engineering*. 2025;2(38):16-24.
6. Zagorodny NA, Zayats YuA, Semykina AS. Methodology for determining effect of starting modes of internal combustion engine on change in engine performance characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(1(95)):88-97.
7. Zayats YuA, Zayats TM, Zagorodny NA. Solution of the first problem of forecasting impacts and residual resource of vehicles. *Transport and Technological Cars*. 2023;3-2(82):25-31.
8. Zayats YuA, Golubev DS. Formulation of the problem of forecasting the residual resource of military equipment and its elements. *Nauchnyy Reserv*. 2021;2(14):51-56.
9. Zayats YuA, Golubev DS, Zayats TM. Information aspect in forecasting the technical condition of vehicles. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, 2021: Information Technologies and Innovations in Transport*. Orel; 2021.
10. Zayats TM, Slutsky KA. System and information analysis of factors affecting the level of combat readiness of fighting machines. *Nauchnyy Reserv*. 2019;2(6):38-47.
11. Zayats YuA. *Fundamentals of reliability theory: textbook*. Ryazan: RVVDKU; 2013.
12. Novikov SV, Zagorodny NA, Semykina AS, Konev AA. Analysis of reserves of non-selective methods for diagnosing the condition of trucks. *Transport and Technological Cars*. 2024;4-3(87):45-54.
13. Semykina AS. Improving the efficiency of technical operation of mining dump trucks in conditions of motor transport of GOK enterprises [dissertation]. [RF]: 2023.
14. Semykina AS, Zagorodny NA, Novikov AN. Improving the efficiency of car service enterprises through the use of digital and information technologies. Belgorod - Orel: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2023.
15. Semykina AS, Zagorodny NA, Konev AA, Shchetinin NA. The use of digital and information technologies to improve the efficiency of car service enterprises. *Transport and Technological Cars*. 2023;1-2(80):89-97.
16. Semykina AS, Zagorodny NA, Koverzhenko DF. Directions of artificial intelligence development in the automotive industry. *Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference, November 23, 2023: High-tech Technologies and Innovations (XXV Scientific Readings)*; Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2023.
17. Semykina AS, Zagorodny NA, Andreeva S. Organization of technological processes of cars maintenance and diagnostics. *Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference, 2023: High-tech Technologies and Innovations (XXV Scientific Readings)*; Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2023.
18. Semykina AS. Malfunctions of modern cars. The use of computer programs to calculate the technical parameters of the piston. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2016.
19. Semykina AS, Zagorodny NA, Koverzhenko DF. Determination of the rational operation period of rock vehicles and assessment of the effectiveness of their use. *Transport and Technological Cars*. 2024;3-1(86):67-74.
20. Shturmanov SS, Golubev DS. Board registrar of diesel operating details UTD-29 BMD-4M. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2018;11:223-230.

#### Информация об авторах:

**Загородный Николай Александрович** – доктор технических наук, доцент, директор Транспортно-технологического института Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, тел. 89202014925, SPIN-код: 5230-3519, AuthorID: 556967, ORCID 0000-0002-2997-3282, Scopus Author ID: 57201774823, AD Scientific Index ID: 4438890.

**Семькина Алла Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, тел. 89040943937, SPIN-код: 8855-4320, ORCID: 0000-0003-4045-4237, WOS Research ID: HJA-2623-2022, Scopus Author ID\*: 57202281085, ID РИНЦ: 984531.

**Новиков Сергей Владимирович** – ассистент кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, тел. 89606259555, SPIN-код: 4428-2327, ORCID 0009-0002-7149-088X.

**Федотов Евгений Александрович** – старший преподаватель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, тел. 8-951-760-25-23, SPIN-код: 7155-7056, ORCID 0000-0001-9148-6728, WOS Research ID: HDM-6870-2022, ID РИНЦ: 615274.

**Zagorodny Nikolay Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Operation and Management of Motor Transport at BSTU named after V.G. Shukhov, 89202014925, spin code: 5230-3519, AuthorID: 556967, ORCID 0000-0002-2997-3282, Scopus Author ID: 57201774823, AD Scientific Index ID: 4438890.

**Semykina Alla Sergeevna** – Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Operation and Organization of Motor Transport at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; phone: 89040943937, SPIN code: 8855-4320, ORCID: 0000-0003-4045-4237, WOS Research ID: HJA-2623-

2022, Scopus Author ID\*: 57202281085, RSCI ID: 984531.

**Novikov Sergey Vladimirovich** – Assistant of the Department of Operation and Organization of Motor Transport at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; phone: 89606259555, SPIN code: 4428-2327, ORCID 0009-0002-7149-088X.

**Fedotov Evgeny Aleksandrovich** – Senior Lecturer at the Department of Computer Software and Automated Systems at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; phone: 8-951-760-25-23, SPIN code: 7155-7056, ORCID 0000-0001-9148-6728, WOS Research ID: HDM-6870-2022, RSCI ID: 615274.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; одобрена после рецензирования 06.05.2026; принята к публикации 27.05.2026. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», проректор по научной работе Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 28.01.2026; approved after review on 06.05.2026; accepted for publication on 27.05.2026. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Vice-Rector for Scientific Work at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.